

SISTEM KENDALI ROBOT MANIPULATOR PEMINDAH BARANG DENGAN UMPAN BALIK VISUAL

Andik Yulianto¹⁾, Edy Ramadan³⁾

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Internasional Batam^{1), 2)}

Jl. Gajah Mada, Baloi Sei Ladi, Batam 29442

Email: andik@uib.ac.id¹⁾, edy_ramadan_28@yahoo.co.id²⁾

ABSTRAK

Paper ini menjelaskan perancangan dan pembuatan sistem kendali robot manipulator yang dikendalikan oleh informasi visual untuk memindah obyek barang sesuai warnanya. Pada penelitian ini digunakan tiga obyek dengan warna yang berbeda. Penentuan posisi obyek dilakukan dengan metode proyeksi integral, dimana citra hasil tangkapan kamera yang terhubung dengan komputer disegmentasi berdasarkan warnanya. Citra hasil segmentasi kemudian ditentukan titik tengahnya berdasarkan jumlah piksel hitam x dan y sebagai posisi obyek. Informasi posisi yang didapatkan digunakan untuk mengendalikan robot untuk mengambil obyek dan memindahkannya ke tempat yang telah ditentukan. Sistem kendali robot terdiri dari mikrokontroler ATmega8 sebagai pengolah data dan antarmuka komputer dengan sistem mekanisme robot. Sebagai penggerak digunakan motor servo dengan pengendalian proporsional dengan metode PWM. Hasil pengujian menunjukkan, pendeteksian posisi obyek dapat dilakukan dengan benar jika dalam area kerja terdapat satu obyek warna saja. Jika terdapat dua obyek dengan warna yang sama dalam satu area, maka posisi titik tengah berada diantara dua obyek. Pengujian sudut gerak servo pada tiap *joint* menghasilkan kesalahan rata-rata motor servo masing-masing, 3,4% untuk servo *base*, 7% untuk servo *shoulder*, dan 1 % untuk servo *end of effector*. Sistem kendali robot yang dibangun berhasil memindahkan barang dengan tingkat keberhasilan sebesar 80% dengan satu obyek warna pada area yang sama.

Kata Kunci: *Visual Servoing, Robot Manipulator, Pengolahan Citra*

ABSTRACT

This paper describes the design and manufacture of robotic manipulator control system which controlled by visual information to move the item objects according to its color. In this research we use three objects with different color. Determination of the position of the object is done by the integral projection method, in which the camera connected to Personal Computer catches images and then segmented based on its color. Object midpoint is determined based on the number of black pixels x and y as the object position. Position information obtained then used to control the robot to pick up objects and move them to a designated place. Control system of robot consist of a ATmega8 microcontroller as data processor and computer interface between computer and robot system mechanism. Servo motor used as actuator which controlled using PWM proportional controller. In this study, the detection of the position of an object can be done correctly if the work area there is only one object color. If there are two objects of the same color in an area, the midpoint of objects is lies between two objects. The joint angle test produce an average error of servo motors, respectively, 3.4% for servo base, 7% for servo shoulder, and 1% for the servo end of the effector. Robot control systems built, successfully move object with a success rate of 80%, in case of one color objects lies on an area.

Key Words: *Visual Servoing, Manipulator Robot, Image Processing*

1. Pendahuluan

Penelitian-penelitian terus dilakukan dengan tujuan untuk memperbaiki dan meningkatkan kinerja suatu sistem produksi atau media produksi sebagai dampak positif, ilmu pengetahuan dan teknologi. Salah satunya topik yang saat ini sedang dikembangkan dan banyak aplikasinya di industri adalah robot dan *image processing*. Salah satunya adalah robot berbasis visual dengan umpan balik *pose* untuk melakukan penjejakan obyek [1].

Penggunaan robot sebagai alat bantu kerja merupakan alternatif yang aman bagi manusia untuk bekerja. Selain itu, penggunaan *image processing* memudahkan manusia untuk mengetahui jenis suatu obyek secara jelas. Sebagian besar industri hanya menggunakan sensor untuk mengetahui keberadaan obyek, namun tidak dapat mengidentifikasi warna, bentuk dan ukurannya dengan menggunakan satu sensor. Kita ketahui industri sekarang berusaha meminimalkan *man power* untuk memproduksi suatu barang dalam jangka besar, sehingga terjadinya *wrong part* pada keadaan *change model* tidak dapat dideteksi oleh sensor yang dipasang. Oleh sebab itu, dengan penerapan *image processing* dapat mencegah kesalahan tersebut secara langsung karena dapat mengidentifikasi obyek secara lengkap. Untuk menentukan obyek dalam pendeteksian tersebut maka menggunakan sistem *visual servoing* untuk melakukannya.

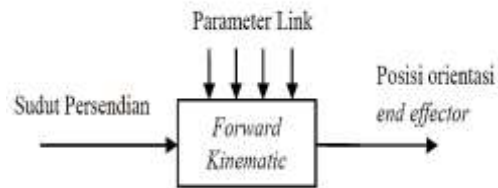
Dalam implementasinya, sistem pengenalan obyek digabungkan dengan robot manipulator yang bertujuan untuk mengambil obyek yang dilengkapi dengan *end effector* berupa suatu *gripper*, magnet atau tools lainnya. Setelah obyek dikenali, robot akan mengambil obyek satu per satu dan memindahkan obyek ke wadah yang telah ditentukan.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat sistem pengenalan obyek menggunakan kamera, dan menggunakannya sebagai masukan robot manipulator dalam memindah barang.

2. Tinjauan Pustaka

A. Kinematika Maju

Kinematika maju (*forward kinematics*) digunakan untuk menentukan posisi dan orientasi *end effector* apabila variabel sudut *joint*-nya telah diketahui. Variabel sudut *joint* yang diberikan diubah ke dalam posisi dan orientasi *end effector* yang ditujukan untuk koordinat referensi [2]. Gambar 1 menjelaskan proses kinematika maju.



Gambar 1. Kinematika maju

Untuk menentukan kinematika maju langkah-langkah sebagai berikut harus dilakukan [2]:

1. Menentukan parameter DH (Denavit Hartenberg).

Parameter DH digunakan untuk menggambarkan hubungan link dari robot dimana link diasumsikan sebagai benda tegar (*rigid body*). Terdapat empat parameter dalam penentuan hubungan *link* tersebut, diantaranya adalah, yang menggambarkan parameter *link*, θ_i dan d_i , yang menggambarkan hubungan antar *link*. Empat parameter a_i , α_i , d_i , θ_i secara umum diberi nama *link lenght*, *link twist*, *link offset*, dan *joint angle* [3]. Tabel 1 menunjukkan parameter DH untuk robot manipulator dengan *i-link* disusun dalam bentuk tabel.

Tabel 1. Parameter DH untuk *i-link* robot manipulator

Link	Joint	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0-1	a_1	α_1	d_1	θ_1
2	1-2	a_2	α_2	d_2	θ_2
3	...	...	...	...	...
4	...	...	...	...	...
i	(i-1)→i	a_i	α_i	d_i	θ_i

Dimana:

a_i = jarak sepanjang sumbu x_i dari θ_i menuju perpotongan sumbu x_i dan sumbu z_{i-1} .

- α_i = sudut antara dan z_i diukur pada posisi x_i .
 d_i = jarak sepanjang sumbu z_{i-1} dari sumbu θ_{i-1} menuju perpotongan sumbu x_i dan z_i .
 θ_i = sudut antara x_{i-1} dan x_i diukur pada posisi z_{i-1} .

2. Mendapatkan *link* matrik tranformasi A_i (matrik A).

Pada aturan DH, tiap matrik transformasi homogen A_i ditunjukkan sebagai sebuah hasil perkalian empat matrik transformasi dasar seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1) [3].

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,\alpha_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (1)$$

3. Menentukan matrik transformasi Homogen H_i^0 .
 4. Menghitung posisi dan orientasi dari *end effector*.

B. Kinematika Balik

Kinematika balik (*inverse kinematics*) digunakan untuk mencari variabel sudut (*joint*) robot dalam menentukan posisi dan orientasi dari *end effector*. Dalam menentukan koordinat *end effector* harus disesuaikan dengan batas area kerja dari jangkauan robot. Formulasi *inverse kinematic* lebih sulit daripada *forward kinematic*, dengan menentukan kinematika balik seperti pada Gambar 2, dapat ditentukan pergerakan robot sesuai dengan keinginan. Secara matematika kinematika balik ditunjukkan pada Persamaan (2) [4].

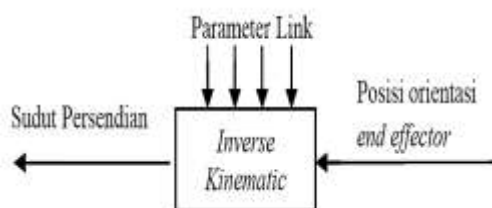
$$\theta_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad (2)$$

dimana

$k = 1, 2, \dots, i$

θ_k = sudut *joint* ke-k

$(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ = posisi dan orientasi



Gambar 2. Proses kinematika balik

C. Segmentasi Warna

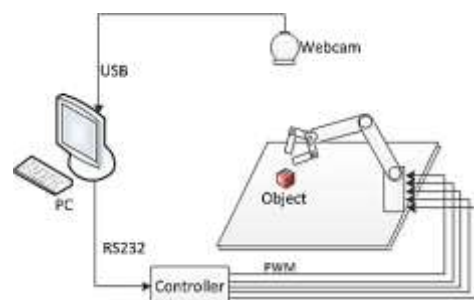
Segmentasi warna menggunakan teknik *thresholding* komposisi RGB dari warna obyek. Teknik *thresholding* warna digunakan untuk memisahkan (segmentasi) obyek terhadap latar belakang citra. *Thresholding* (pengambilan) artinya adalah nilai piksel pada citra yang memenuhi syarat nilai ambang yang ditentukan dirubah ke nilai tertentu yang dikehendaki. Secara matematis ditulis seperti pada Persamaan (3) [5].

$$f_o(x, y) = \begin{cases} T_1, & f_i(x, y) \leq T_1 \\ T_2, & T_1 < f_i(x, y) \leq T_2 \\ T_3, & T_2 < f_i(x, y) \leq T_3 \\ \dots & \dots \\ T_n, & T_{n-1} < f_i(x, y) \leq T_n \end{cases} \quad (3)$$

Dengan $f_i(x, y)$ adalah citra asli (*input*), $f_o(x, y)$ adalah piksel citra baru (hasil/*output*), T_n adalah nilai ambang yang ditentukan. Nilai piksel pada (x, y) citra *output* akan sama dengan T_1 jika nilai piksel (x, y) citra *input* tersebut $\leq T_1$. Nilai piksel (x, y) citra *input* akan sama dengan T_2 jika $T_1 < f_i(x, y) \leq T_2$, dan seterusnya.

3. Metode Penelitian

Secara garis besar, tahapan implementasi sistem kendali robot pemindah barang terbagi menjadi dua bagian, yaitu: 1) sistem pengolahan citra yang digunakan untuk mengambil gambar barang, kemudian diolah agar dapat diketahui titik tengah barang dengan warna tertentu, dan 2) sistem kendali robot mencakup pemodelan kinematika balik dari robot, serta pengendalian dengan kendali proporsional. Gambar 3 merupakan diagram asitektur robot pemindah barang.



Gambar 3. Arsitektur sistem robot dengan kendali visual

A. Subsistem Visi

Sistem visi bertugas memberikan masukan posisi obyek yang akan dipindahkan dengan membedakan dari warnanya. Sistem visi terdiri dari sebuah kamera yang terpasang diatas area kerja robot lengan setinggi 120 cm. Kamera berfungsi menangkap gambar obyek, membedakannya berdasarkan warna dan memberikan koordinat obyek di area kerja ke sistem kontrol di PC. Subsistem visi bekerja mencakup beberapa proses pengolahan citra berikut:

1. Preprocessing

Proses awal yang dilakukan adalah menangkap obyek secara visual menggunakan kamera webcam yang terhubung dengan PC. Proses ini menghasilkan citra dari sudut pandang kamera dengan ukuran 320x240 piksel.

2. Segmentasi

Operasi segmentasi mencakup *gray-scaling* dan *thresholding*. Proses *gray-scaling* digunakan untuk mengubah citra warna menjadi citra abu-abu untuk kemudian dilakukan proses *thresholding* pada citra hasil. *Thresholding* merupakan proses mengubah citra *gray-scale* menjadi citra biner dengan memanipulasi 3 nilai ambang (*Red*, *Green*, dan *Blue*) yang berfungsi untuk memisahkan obyek pada citra dengan latar belakangnya. Dari sini obyek akan dipisahkan berdasarkan warnanya.

3. Estimasi posisi

Estimasi posisi dilakukan dengan metode proyeksi integral. Metode ini menghasilkan koordinat titik tengah obyek hasil proses segmentasi.

Penentuan titik tengah obyek

Penentuan titik tengah obyek dilakukan dengan metode proyeksi integral, yaitu dengan mencari *center of gravity* dari citra yang sudah disegmentasi. Teknik ini bisa disebut dengan integral baris dan kolom piksel, karena integral ini menjumlahkan piksel perbaris dan piksel perkolom [5]. Persamaan (4) merupakan persamaan yang digunakan.

$$Hx = \sum_{y=1}^{Ny} I(x, y), Hy = \sum_{x=1}^{Nx} I(x, y) \quad (4)$$

Dimana:

Hx = jumlah piksel hasil integral proyeksi terhadap baris x.

Hy = jumlah piksel hasil integral proyeksi terhadap kolom y.

$I(x,y)$ = piksel hitam pada baris ke-x dan kolom ke y

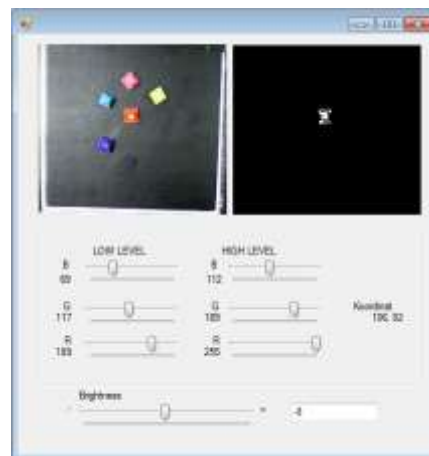
Ny = panjang citra (piksel)

Nx = lebar citra (piksel)

Dengan metode ini kita akan dengan mudah untuk menemukan daerah obyek tunggal yang kita perlukan. Untuk mencari titik tengah diperlukan titik paling kiri obyek (x_1) dan titik paling kanan obyek (x_2) serta titik paling atas (y_1) dan titik paling bawah (y_2). Setelah diketahui titik-titik tersebut dapat ditentukan titik tengah obyek menggunakan Persamaan (5).

$$\begin{aligned} center_x &= \frac{(x_1 + x_2)}{2} \\ center_y &= \frac{(y_1 + y_2)}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

Gambar 4 merupakan tampilan hasil pengembangan program aplikasi proyeksi integral yang dikembangkan dengan bahasa pemrograman Visual Basic untuk mendeteksi titik tengah obyek.

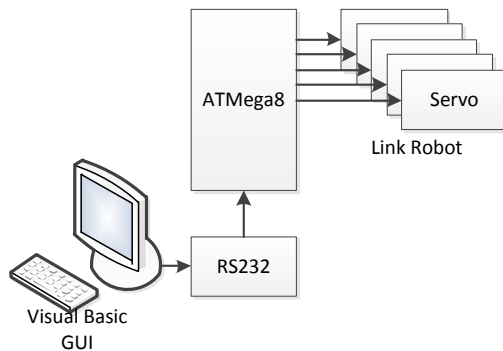


Gambar 4. Pendeteksian titik tengah dengan integral proyeksi

B. Subsistem Kendali Robot

Sistem kendali robot merupakan sistem kendali proporsional menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk mengontrol 5 buah servo. Masukan kontroler merupakan nilai *setpoint* yang didapatkan dari hasil pengolahan citra di *Personal Computer* (PC).

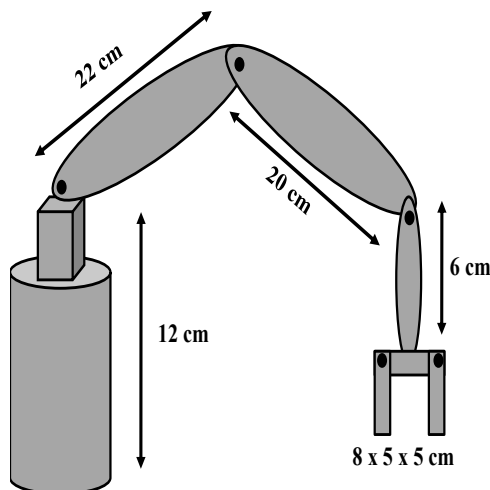
Sebagai kontroler digunakan mikrokontroler ATmega8 yang terhubung ke PC menggunakan komunikasi serial RS232. PC digunakan sebagai antarmuka program sekaligus untuk mengolah data *image* agar didapatkan posisi obyek. Gambar 5 merupakan diagram sistem kendali robot. Program kendali pada PC dikembangkan dengan menggunakan Visual Basic.



Gambar 5. Subsistem kendali robot

C. Perancangan Robot Manipulator

Robot yang digunakan pada penelitian ini merupakan robot yang memiliki 4 DOF (*Degree of Freedom*) yang dilengkapi *gripper* pada bagian *end effector*. Robot dirancang memiliki 4 *joint* dengan tipe *revolute* masing-masing adalah *base*, *shoulder*, *elbow* dan *gripper*. Tiap *joint* pada robot digunakan motor DC servo. Gambar 6 merupakan dimensi robot yang dirancang, sedangkan Gambar 7 menunjukkan Robot yang dibangun.



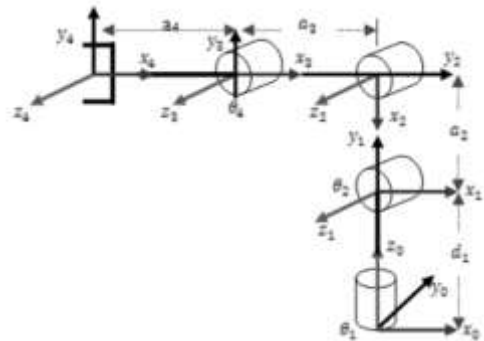
Gambar 6. Robot manipulator



Gambar 7. Perancangan robot manipulator

Pemodelan Robot

Pemodelan robot digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kinematika. Gambar 8 menunjukkan pemodelan robot manipulator pada penelitian ini.



Gambar 8. Pemodelan robot manipulator

Kinematik Maju Robot Manipulator

Untuk dapat menyelesaikan permasalahan robot manipulator, perlu direpresentasikan dulu matrik transformasi D-H. Tabel 1 menunjukkan parameter-parameter D-H yang didapat berdasarkan Gambar 8.

Tabel 2. Parameter Denavit-Hartenberg Robot Manipulator

Joint	Link Length (a_i)	Link Offset (d_i)	Joint angle (θ_i)	Twist Angle (α_i)
1	0	12cm	θ_1	90°
2	22cm	0	θ_2	0
3	20cm	0	θ_3	0
4	6cm	0	θ_4	0

Persamaan matriks transformasi D-H untuk tiap *joint* robot, ${}^0\mathbf{A}_1$, ${}^1\mathbf{A}_2$, ${}^2\mathbf{A}_3$, ${}^3\mathbf{A}_4$, ${}^4\mathbf{A}_5$, didapat berdasarkan Tabel 2 di atas.

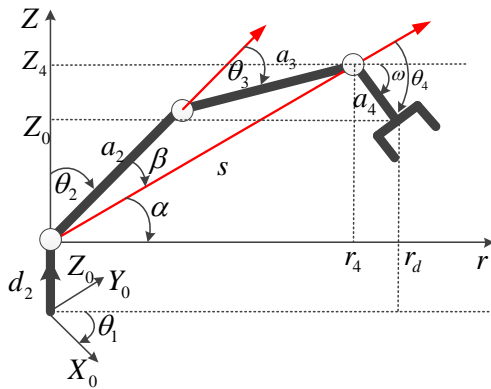
Kemudian matrik transformasi *end-effector* terhadap *base* (**T**), didapatkan dengan melakukan perkalian terhadap matrik-matrik transformasi DH.

Kinematika Balik Robot Manipulator

Pada Gambar 9 sumbu r merupakan rotasi dari sumbu x_0 terhadap z_0 sehingga diketahui sudut θ_1 dan panjang r_d masing-masing melalui Persamaan (6) dan (7).

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y_o}{x_o} \quad (6)$$

$$r_d = \sqrt{y_o^2 + x_o^2} \quad (7)$$



Gambar 9. Solusi *inverse kinematic*

dari Persamaan (8) dan (9) dapat diketahui panjang r_4 dan z_4

$$r_4 = r_d - a_4 \cos w \quad (8)$$

$$z_4 = z_o + a_4 \sin w - d_1 \quad (9)$$

Sehingga nilai s , α (sudut *end-effector* terhadap *base*), dan sudut β dapat ditentukan.

$$s = \sqrt{r_4^2 + z_4^2} \quad (10)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{z_4}{r_4} \quad (11)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{s^2 + a_2^2 - a_3^2}{2sa_2} \quad (12)$$

Dari nilai variabel s , α , dan β maka sudut θ_2, θ_3 dan θ_4 masing-masing didapatkan dari Persamaan (13), (14) dan (15).

$$\theta_2 = -90 + \alpha + \beta \quad (13)$$

$$\theta_3 = 180 - \cos^{-1} \frac{a_3^2 + a_2^2 - s^2}{2a_2a_3} \quad (14)$$

$$\theta_4 = -90 + \omega - \theta_2 - \theta_3 \quad (15)$$

4. Hasil dan Pembahasan

A. Uji Sistem Visi

Pengujian berupa pengambilan titik tengah obyek sesuai dengan warna yang diinginkan. Selain itu juga dibutuhkan pengaturan pada nilai warna merah, hijau dan biru untuk mendapatkan nilai yang kita uji.

Gambar 10 merupakan hasil pengujian sistem visi dalam mengambil titik tengah satu warna obyek. Terlihat bahwa obyek dapat dikenali dan titik tengah obyek dapat diidentifikasi dengan baik.



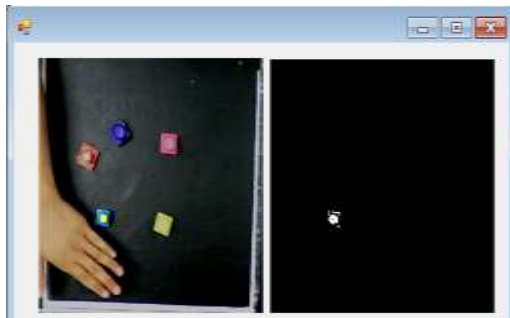
Gambar 10. Pengujian pengambilan titik tengah satu warna obyek.

Berikutnya sistem visi diuji juga performanya dalam mendeteksi titik tengah obyek, dimana terdapat dua obyek dengan warna yang sama dalam satu area kerja. Hasil dari pengujian ini disajikan pada Gambar 11. Tampak bahwa dua obyek dengan warna yang sama (dalam kasus ini akan diambil warna hijau), dapat diidentifikasi posisinya, namun penentuan titik tengah obyek masih salah. Posisi titik tengah yang dihasilkan terletak diantara kedua obyek.



Gambar 11. Pengujian pengambilan titik tengah dua warna obyek.

Gambar 12 merupakan pengujian sistem visi dalam menentukan titik tengah obyek dengan menggunakan gangguan. Gangguan yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebuah tangan. Terlihat bahwa tangan yang tertangkap kamera tidak mempengaruhi hasil penentuan titik tengah obyek.



Gambar 12. Pengujian pengambilan titik tengah obyek dengan gangguan tangan

B. Uji Sudut Joint

Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui tingkat akurasi kontrol servo dalam membentuk sudut sesuai hasil perhitungan kinematika balik oleh PC.

Tabel 3. Hasil Pengujian Servo Base

No	Sudut	PengukuranAktual	Error
1	0°	5°	5°
2	15°	10°	5°
3	30°	25°	5°
4	45°	44°	1°
5	60°	55°	5°
6	90°	90°	0°
7	120°	123°	3°
8	135°	135°	0°
9	150°	145°	5°
10	180°	175°	5°
Error rata-rataServo Base			3,4°

Tabel 4. Hasil Pengujian Servo Shoulder

No	Sudut	PengukuranAktual	Error
1	0°	0°	0°
2	15°	11°	4°
3	30°	36°	6°
4	45°	46°	1°
5	60°	64°	4°
6	90°	99°	9°
7	120°	129°	9°
8	135°	152°	17°
9	150°	163°	13°
10	180°	-	-
Error rata-rata Servo Shoulder			7°

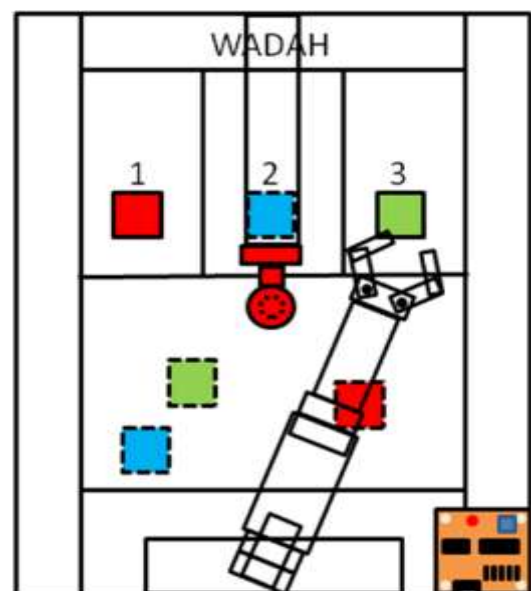
Tabel 5. Hasil Pengujian Servo Elbow

No	Sudut	PengukuranAktual	Error
1	0°	0°	0°
2	15°	10°	5°
3	30°	30°	0°
4	45°	45°	0°
5	60°	63°	3°
6	90°	90°	0°
7	120°	120°	0°
8	135°	133°	2°
9	150°	150°	0°
10	180°	180°	0°
Error rata-rataServo End of Effector			1°

Pengujian dilakukan pada tiap servo *joint*. Tabel 3, 4 dan 5 merupakan hasil pengujian tiap servo.

C. Uji Robot Memindahkan Barang

Pada pengujian ini awalnya obyek diletakkan di bagian area kerja secara acak dengan titik koordinat yang berbeda-beda. Selanjutnya menggunakan program *software* keseluruhan untuk mendapatkan warna obyek dan menentukan kemana obyek tersebut harus diletakkan. Gambar 13 merupakan ilustrasi eksekusi kerja robot manipulator dari titik awal sampai dengan wadah obyek yang disediakan.



Gambar 13. Skema peletakan obyek berdasarkan warnanya

Hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan robot dalam meletakkan obyek ke wadah yang ditentukan mencapai 80%.

Tabel 6. Uji kinerja Robot Keseluruhan

Uji	Warna obyek	Koordinat		Wadah ke	Hasil
		X	Y		
1	Merah	31	10	1	OK
2	Biru	9	10	2	OK
3	Hijau	6	5	3	OK
4	Merah	20	14	1	OK
5	Biru	17	15	2	OK
6	Hijau	12	3	3	Gagal
7	Merah	7	14	1	Gagal
8	Biru	6	6	2	OK
9	Hijau	10	10	3	OK
10	Merah	30	9	1	OK
Tingkat Keberhasilan					80%

5. Kesimpulan

Artikel mengenai pembuatan robot manipulator pemindah barang dengan umpan balik visual telah dijelaskan dalam paper ini. Hasil dari beberapa pengujian dapat diringkas seperti berikut:

1. Sistem visi dapat bekerja baik untuk obyek dengan satu warna saja. Jika terdapat obyek dengan warna yang sama terdapat dalam satu area kerja, maka titik tengah yang terdeteksi adalah titik tengah diantara dua obyek.
2. Kesalahan rata-rata motor servo dalam uji sudut per-joint yaitu, untuk servo *base* 3,4%, servo *shoulder* 7%, servo *end of effector* 1%.
3. Setelah melakukan pengujian dan pengambilan data sampel, sistem yang dibuat mampu mencapai tingkat keberhasilan rata-rata hingga 80%.

Daftar Pustaka

- [1] Daryatmo, Budi [2007], "Sistem Kendali Robot Berbasis Visual Dengan Umpan Balik Posisi Dan Orientasi Untuk Penjejakan Obyek Bergerak", *Jurnal Algoritma*, Vol. 3 No.2, pp.15-24.
- [2] Alassar, A.Z.; Abuhadrous, I.M.; Elaydi, H.A. [2010], "Modeling and control of 5 DOF robot arm using supervisory control", *Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, 2010 *The 2nd International Conference on*, vol.3, no., pp.351,355, 26-28 Feb.
- [3] M.W. Spong, S. Hutchinson and M. Vidyasagar [2005]. *Robot Modeling and Control*, 1st Edition, Jon Wiley & Sons, Inc.
- [4] Ariyati, Valettariski dan Effendie, Rusdhianto [2012]. "Perancangan dan Implementasi Trajectory Point To Point dengan Metode Algoritma Genetika pada Manipulator 4 DOF", Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [5] Yulianto, Andik; Achmad Jazidie; Imam Arifin [2011], "Identifikasi Posisi dan Orientasi Robot Menggunakan Integral Proyeksi Pada Robot Soccer", *Proceeding Seminar Nasional Pascasarjana XI*, ITS, Surabaya, pp. 191-195.